

水田排水からの全リン除去と循環利用を目的とした環境負荷低減技術の検討

木更津工業高等専門学校 学生会員 ○伊藤 涼
木更津工業高等専門学校 正会員 上村 繁樹, 大久保 努

1 目的

現代農業はリン鉱石から得られるリンに依存しているが、リン資源は再生不可能な資源であり、現在の世界のリンの埋蔵量では 50~100 年で枯渇する可能性があることが指摘されている¹⁾。先進国では、水系へのリン負荷量に占める農業の割合が 50~80%と高い比率を示しており、経済協力開発機構（以下、OECD）によると、リン資源の循環利用ができていない国も多く、日本では 1 ha 当たりの余剰リンが 50 kg を超えており OECD 加盟国中で最低を記録している²⁾。また、肥料として用いられた残存リンが農業排水として排出され、多くの国で地下水汚染や閉鎖性水域での富栄養化の原因物質となり、生態系に深刻な影響を与える。それに付随して *Anabaena* 属や *Microcystis* 属などの藍藻類の異常繁殖に起因する飲料水の異臭味問題が近年よく議論に挙げられる⁽⁵⁾。日本では農業用水の約 94%が水田灌漑用水として用いられており、水田排水中のリンを除去・回収することで、閉鎖性水域の水質を保全する必要がある。

そこで、稲作で排出される籾殻を野焼き法と同等の温度で炭化した籾殻炭を用いて、水田排水中の低濃度リン (≤ 1 mg-P/L) を吸着させることで、再度リン含有土壌改良材として農地へ還元できると考えた。本研究は、①水田の排水量及び全リン濃度を測定、②ダム湖の藍藻類の増殖との関係性を評価、③水田排水の低濃度リンを対象とした籾殻炭による吸着性能を評価することで、水田排水による水環境へ与える負荷を算定し、リン資源の循環利用を促す技術の開発を目的とする。

2 実験方法

2.1 調査地区の概要と試料採取

本研究では、千葉県市原市の水田を対象とし実験を行う。対象ダム及び河川は高滝ダムと高滝ダムに流れ込む養老川とした。試料採取期間は、稲作で水を利用する 2022 年 4 月 14 日~7 月 31 日とした。養老川及び高滝ダムは 4 月 14 日~8 月 18 日とした。

2.2 排水量測定

水田からの排水量を測定するため、三角堰を用いた流量測定装置を開発した。この装置は、Arduino の距離センサーを用いて切欠きから流れ出る水の水面までの距離 x を自動記録し、そのデータから事前実験により得た式(1)に当てはめ流量 Q を算定した。

$$Q = -0.6485x + 98.684 \quad (1)$$

2.3 水質分析・藍藻類計数

調査項目は水質汚染及び藍藻類の増殖の原因物質となる $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, T-P, 有機物指標となる TOC とした。採取した試料は 0.45 μm メンブレンフィルター (GB-140, ADVANTEC) を用いて濾過し、その濾液を各種の機器分析に用いた。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ はイオンクロマトグラフ (ECO IC, Metrohm), T-P は水質分析器 (DRB200, HACH), TOC は TOC 分析器 (enviroTOC, elementar) で測定した。イオンクロマトグラフの分析に用いた分離液は、陰イオン側に 1.8 mM NaHCO_3 /1.7 mM NaHCO_3 , 陽イオン側に 1.7 mM HNO_3 /1.7 mM ジピコリン酸, 再生液は 100 mM H_2SO_4 , 洗浄液は超純水を使用した。

藍藻類の計数は倒立顕微鏡 (IX73, Olympus) と界線スライドグラス (松浪硝子) を用いて明視野観察で測定した。また、藍藻類は飲料水の異臭味を引き起こす原因物質であるジェオスミンを排出する *Anabaena* 属と *Microcystis* 属を代表種として計数を行い、*Anabaena* 属は 200 μm を 1 単位、*Microcystis* 属は直径 100 μm を 1 単位とし、1 単位当たりの平均細胞数を乗じたものをデータとして取り扱った。

2.3 リン吸着実験

水田排水中のリンを吸着させる素材として籾殻炭を炭化した籾殻炭を使用した。籾殻炭は電気炉 (FO710, ヤマト科学) により 500 度で 1 時間焼成したものを使用した。吸着実験は容積 200 mL の三角フラスコに水田流出水を想定した 0.5 mg/L 及び畜産業排水を想定した 20.0 mg/L のリン酸イオン溶液と秤量した籾殻炭を投入し、24 時間振とう (100 rpm) 後のリン濃度より吸着量を算定した。

キーワード 水田排水, 全リン吸着, 籾殻炭, *Anabaena* 属, *Microcystis* 属

連絡先 〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1 木更津高専 TEL : 0438-30-4165 E-mail : okubo@c.kisarazu.ac.jp

3 実験結果及び考察

3.1 水質分析結果及び考察

図1より、全リン濃度は流入水で0.12~0.49 mg/L、流出水で0.12~1.07 mg/Lで推移し、全体的な傾向として流出水のほうが高い濃度で推移した。水田土壌に施肥された肥料に含まれる全リンが水中に溶出し、全リン濃度が上昇したと考えられた。流出水のデータは変動が大きく、排水量と全リン濃度には明確な相関関係は確認されなかった。

3.2 微生物構成の変化

図2に藍藻類の計数結果と高滝ダムの全リン濃度、水温及び日射量を示す。田中らの研究によると、藍藻類が200 cells/mLを超えると、水道水のカビ臭問題を引き起こすジェオスミン濃度が10 ng/Lを超え、異臭味被害が発生すると報告されている³⁾。6月上旬から7月中旬にかけて *Anabaena* 属、6月下旬から8月中旬まで *Microcystis* 属が200 cells/mLを超えており、藍藻類の平均細胞数は *Anabaena* 属が約7000 cells/mL（最大約18600 cells/mL）、*Microcystis* 属が約3400 cells/mL（最大約5600 cells/mL）であった。

3.3 リン吸着実験結果と吸着量の算定

表1に全リン吸着実験結果を示す。両系とも籾殻炭1.0 g投入の条件で吸着効果が最も高く、初期濃度0.5 mg/Lで8%、20.0 mg/Lで15%の吸着効果を示した。籾殻炭の量を増やしたことで、逆に溶液と炭との接触効率が低下し、吸着量も低下したと考えられた。水田では1 ha 当たり約1 tの籾殻が発生するため、対象水田では約200 kgの籾殻が排出される。全量を炭化させて全リン吸着に使用したとすると、対象水田で約0.008 kg全リンを吸着することができる。これは2.4%程度の回収率である。

4 まとめ

本研究は①水田の排水量及び全リン濃度を測定、②ダム湖の藍藻類の増殖との関係性を評価、③水田排水の低濃度リンを対象とした籾殻炭による吸着性能を評価することで、水田排水による水環境へ与える負荷を算定し、リン資源の循環利用を促す技術の開発を目的として研究を行った。

- ① 日々の測定結果より、排水量は1.0~45.6 L/min（平均10 L/min）、流出水的全リン濃度は0.12~1.07 mg/L（平均0.34 mg/L）であり、水田からの全リン流出量を算出できた。
- ② 6月上旬から7月中旬にかけて *Anabaena* 属の平均細胞数が約7000 cells/mL（最大約18600 cells

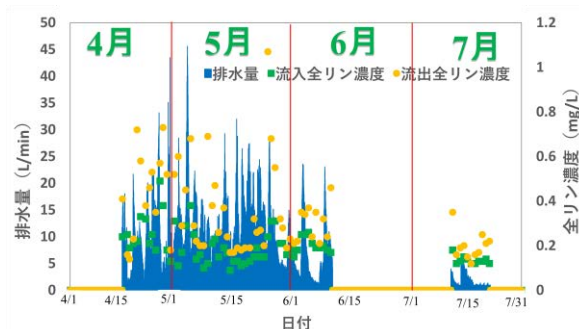


図1 排水量と流入水・流出水的全リン濃度

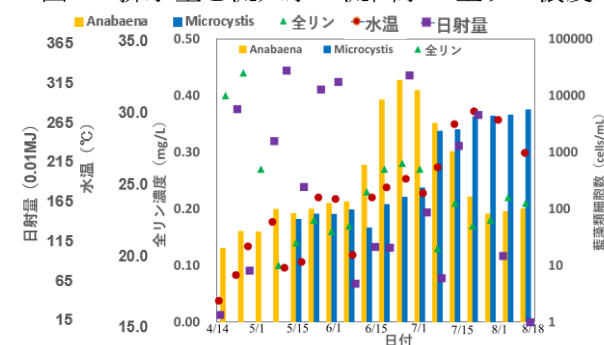


図2 藍藻類細胞数と全リン濃度・水温・日射量

表1 籾殻炭の質量と全リン吸着量

籾殻炭の質量(g)	全リン吸着量(mg/g)	
1.0	0.04	3.0
2.0	0.03	2.8
3.0	0.03	2.7
4.0	0.02	2.4
5.0	0.02	2.2
全リン初期濃度(mg/L)	0.5	20.0

/mL)、6月下旬から8月中旬まで *Microcystis* 属の細胞数が約3400 cells/mL（最大約5600 cells/mL）であった。藍藻類の増殖は水温が増殖に影響を与えることがわかった。しかし、藍藻類増殖に必要な栄養塩であるリンを除去することが根本的な解決のために重要になる。

- ③ ①で得たデータや籾殻炭によるリン吸着実験から、2.4%と非常に少ないものの、排水中の全リンを吸着し、農地に還元することで循環利用できる可能性が示された。

参考文献

- 1) D. Cordell et al., The story of phosphorus: global food security and food for thought, Global Environmental Change, Vol. 19, pp.292-305, 2009.
- 2) OECD, 2016 Edition of the OECD Environmental Database. <https://data.oecd.org/agrland/nutrient-balance.htm>（閲覧日2022年9月20日）
- 3) 田中宏憲他, 藍藻類によるカビ臭発生と気象要因の関係性に関する全国事例解析, 用水と廃水, Vol.64, No.2, pp. 55-63, 2022.